

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.021

基于 HYDRUS - 3D 的微咸水膜孔沟灌水盐分布数值模拟*

马海燕¹ 王昕¹ 张展羽² 冯根祥² 吕宁江¹

(1. 山东省水利科学研究院, 济南 250013; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 利用 HYDRUS - 3D 模型对室内试验条件下微咸水膜孔沟灌水盐分布进行数值模拟, 结果表明 HYDRUS - 3D 模型模拟膜孔沟灌入渗过程的可靠性较高。在此基础上, 通过模型模拟, 对不同方案下的水盐运移规律进行探索, 结果表明: 当灌水量为 450 ~ 900 m³/hm² 时, 3%、6% 和 9% 开孔率下的脱盐率均在 46% 以上, 短期内达到 0 ~ 40 cm 土层内压盐的效果, 可为花生的生长提供良好环境。为达到节水、压盐的效果, 膜孔沟灌条件下的灌水量不宜小于 300 m³/hm²。

关键词: HYDRUS - 3D 模型 微咸水 膜孔沟灌 水盐分布 数值模拟

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0137-09

Numerical Simulation of Water-salt Distribution under Brackish Water Film Hole Furrow Irrigation Based on HYDRUS - 3D Model

Ma Haiyan¹ Wang Xin¹ Zhang Zhanyu² Feng Genxiang² Lü Ningjiang¹

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250013, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As the starting point to the research of water-salt transport rules under the condition of film hole furrow irrigation, water-salt distribution under brackish water film hole furrow irrigation was studied systematically by experimental observation and numerical simulation. Infiltration of film hole furrow irrigation under the condition of laboratory test was simulated with HYDRUS - 3D model. Using HYDRUS - 3D model to simulate the infiltration of film hole furrow irrigation was a method with relatively higher reliability. Simulation scenarios with three holed ratios and four irrigation water amount levels were designed on this basis. The water-salt transport rules of different simulation scenarios were explored, so as to provide reference for the design of film hole furrow irrigation. Simulation results showed that when irrigation amount changed from 450 m³/hm² to 900 m³/hm², the soil salt in 0 ~ 40 cm soil depth could be restrained in a short time, and the salt rejection rate of 3%, 6% and 9% holed ratios were all above 46%, which could provide good environment for the growth of peanuts. Under the condition of film hole furrow irrigation, irrigation amount should not be less than 300 m³/hm² for achieving the effects of economizing water and reducing salt content. The research results could both provide theoretical and technical basis for popularization and application of brackish water film hole furrow irrigation technology and provide reasonable soil secondary salinization prevention measures as well as scientific basis for water management in the field.

Key words: HYDRUS - 3D model Brackish water Film hole furrow irrigation Water-salt distribution Numerical simulation

收稿日期: 2014-02-11 修回日期: 2014-05-23

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B05-4)、水利部科技推广计划资助项目(TG1204)和农业部公益性行业科研专项资助项目(200903001-05)

作者简介: 马海燕, 工程师, 博士, 主要从事灌溉排水理论及技术研究, E-mail: baby0807@163.com

引言

中国淡水资源紧缺,合理利用微咸水资源是缓解水资源供需矛盾的有效途径之一。中国有丰富的地下咸水资源^[1],主要分布在其干旱、半干旱和滨海地区。据统计,目前中国可利用的微咸水资源约为200.0 t/a,其中可开采量为130.0 t/a,绝大部分微咸水分布于地下10~100 m,宜于开采利用^[2]。在一定的技术条件下将上述水资源加以充分利用,将有效缓解中国淡水资源缺乏的现状^[3-7]。

国内外众多学者对多种灌溉方式下的水盐问题做了研究,增加了人们对灌溉技术所产生的水盐运移问题的认识,但从文献内容来看,多集中在(膜下)滴灌、沟灌等方面,对膜孔沟灌条件下水盐问题的研究相对较少^[8-12]。膜孔沟灌在我国已有十几年的应用历史,实践证明其节水增产效果非常显著。因此,采用微咸水膜孔沟灌,集新型水资源与节水技术于一体,对与其相配套的理论与技术进行研究具有重要的现实意义。

本文采用试验观测与数值模拟相结合的研究手段,探索分析土壤水盐运移规律,结合室内试验对微咸水膜孔沟灌条件下土壤水盐运移规律进行系统研究,为微咸水膜孔沟灌技术的推广应用提供理论基础及技术依据,同时为合理制定土壤次生盐碱化防治措施和田间水分管理提供科学依据。

1 材料与试验方法

1.1 试验装置及供试土壤

根据膜孔沟灌入渗的试验要求,自行设计研制了膜孔沟灌入渗装置,该装置由入渗试验土箱、膜孔入渗板、水室盖板、马氏瓶等组成,如图1所示。

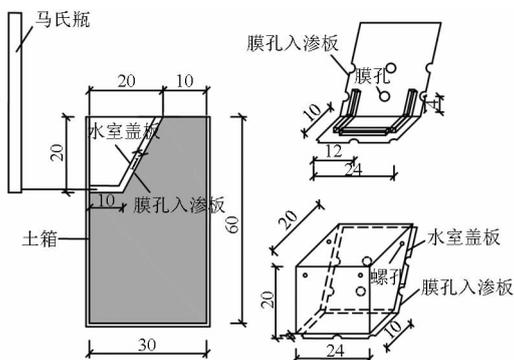


图1 膜孔沟灌入渗试验装置示意图(单位:cm)

Fig.1 Schematic of film hole furrow irrigation experimental apparatus (unit: cm)

入渗土箱采用厚12 mm的有机玻璃板制作,设计沟距60 cm;土箱内部尺寸为长24 cm×宽30 cm×深60 cm(设计土箱深60 cm的主要原因:主要针对

花生根系范围内的水盐运移规律进行研究,而花生的根系主要分布在地表下30 cm左右的深度内);为便于装土时控制土壤干容重和在试验过程中观测湿润锋的运移位置,沿箱壁垂直方向每隔5 cm做标记^[13]。设计灌水沟横断面为梯形,上口宽40 cm,底宽20 cm,沟深20 cm,垄宽20 cm。考虑到灌水沟横断面的对称性,只进行一半灌水沟的入渗试验^[14]。膜孔入渗板厚3 mm,其垂高20 cm、上口宽20 cm、底面宽10 cm。膜孔入渗板上方设有同形状的盖板,水室盖板用厚度6 mm的有机玻璃板制作,二者间隔1 cm,形成容积较小的水室,可提高马氏瓶的灵敏度,从而提高试验精度^[15]。试验供水装置为马氏瓶,横截面积64.4 cm²,设计沟内水深控制在12 cm,单位沟长入渗水量的观测灵敏度为0.2 cm²。灌溉水矿化度控制在1.5 g/L左右,与田间试验区灌溉水的实际矿化度(1.4 g/L)接近。

试验供试土壤从山东莱州朱旺试验区的农田采集,土壤质地为砂壤土,为典型的滨海滩涂盐碱地,土壤组成成分见表1。

表1 试验土壤组成成分

Tab.1 Composition of experiment soil

成分	粘粒	粉粒	砂粒
含量/%	9.0	8.3	82.6

1.2 试验设计

试验时根据不同的膜孔布置方案选用不同规格的膜孔入渗板,布置方案详见表2。

1.3 试验分析与测定方法

1.3.1 土壤含水率及含盐量

采用土壤水分、水势、温度、盐分监测系统(TDR-MUX,易科泰生态技术有限公司,产地美国)观测灌水过程中的土壤水分和盐分。灌水前在土箱内灌水沟垄上分层(每20 cm一层)预埋FP/mts土壤水分、温度和电导传感器,试验过程中采用TDR/MUX/mpts数据采集器采集试验数据。

由于目前国内表示土壤含盐量的单位多为g/kg,所以,建立了电导率和土壤含盐量的经验关系式

$$S = 0.0347E_c + 0.15 \quad (1)$$

式中 S ——土壤含盐量,g/kg

E_c ——电导率,mS/cm

1.3.2 灌水质量评价指标

目前常用的地面灌溉灌水质量评价指标为灌水效率和灌水均匀度,由于室内试验只取一段灌水沟进行,灌水均匀度指标不适用。另外,因微咸水灌溉涉及盐分的运移情况,本次灌水质量评价中引入脱

表2 膜孔布置方案
Tab.2 Film hole arrangement

序号	膜孔布置方案	开孔率/%	膜孔位置	膜孔个数	膜孔直径/cm	孔距/cm	总灌水量/m ³
1	全沟断面6排孔	3	沟底与沟壁交界处	1个全孔,2个1/2孔	2	12	0.00645
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底4cm	1个全孔,2个1/2孔	2	12	
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底8cm	1个全孔,2个1/2孔	2	12	
2	全沟断面6排孔	6	沟底与沟壁交界处	3个全孔,2个1/2孔	2	6	0.00645
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底4cm	3个全孔,2个1/2孔	2	6	
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底8cm	3个全孔,2个1/2孔	2	6	
3	全沟断面6排孔	9	沟底与沟壁交界处	5个全孔,2个1/2孔	2	4	0.00645
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底4cm	5个全孔,2个1/2孔	2	4	
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底8cm	5个全孔,2个1/2孔	2	4	

盐率,从水、盐两个方面对微咸水膜孔沟灌的灌水质量进行综合评价。计算方法如下:

灌水效率计算式为

$$E_a = \frac{W_1}{W} \quad (2)$$

式中 E_a ——灌水效率

W_1 ——灌溉后存储于计划湿润作物根系土壤区内的水量, m³或 mm

W ——田间总灌水量, m³或 mm

脱盐率计算式为

$$E_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_a - S_b}{S_a} \right)_i \quad (3)$$

式中 E_s ——脱盐率

n ——沿沟长测定的土壤含盐量横断面个数

S_a 、 S_b ——灌水前、后各层土壤含盐量, g/kg

1.3.3 数据分析

本文试验数据的分析处理及文中的图表制作采用统计分析软件 SPSS。

1.4 数学模型

1.4.1 HYDRUS-3D 模型简介

HYDRUS-3D 模型是 Šimunek 等 2006 年研发的可用于模拟土壤水流运动、溶质运移、热量传输与根系吸水的二维、三维运动的有限元计算模型。该模型水流状态为三维饱和-非饱和达西水流,忽略空气对土壤水分运动的影响,水分运动方程采用修改过的 Richards 方程,对溶质及热运动采用对流弥散方案,为考虑作物根系吸水在方程中嵌入源汇项^[15-16]。程序可灵活处理各类水流边界,包括定水头边界、变水头边界、定流量边界、渗水边界、大气边界及自由排水边界等。模拟水流区域可以是规则或不规则水流边界,也可由各向异性的非均质土壤组成。通过对水流区域进行不规则三角形或三棱柱和三棱锥网格剖分,控制水流和传输方程均采用 Galerkin 线状有限元法进行求

解,采用隐式差分对时间进行离散,用迭代法将离散化后的非线性控制方程线性化^[17]。

1.4.2 水分运动基本方程

基本假设:各层土壤均值且各向同性,水分运动中土壤结构不变。

膜孔沟灌水分入渗属于三维非饱和土壤水分运动,由于膜孔沟灌入渗的湿润体形状不对称,根据土壤水动力学原理,采用直角坐标系下以土壤含水率为因变量的非饱和土壤水分运动基本方程。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (4)$$

式中 θ ——土壤体积含水率, cm³/cm³

t ——入渗时间, min

x 、 y 、 z ——直角坐标下的坐标, cm

$K(\theta)$ ——土壤非饱和导水率, cm/min

$D(\theta)$ ——非饱和土壤水扩散率, cm²/min

1.4.3 溶质运移方程

溶质在土壤中受对流和弥散两种运动的影响,在模型中用对流弥散方程表示溶质的运移。

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ij}^{\omega} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ij}^{\omega} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ij}^{\omega} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_i c)}{\partial z} \quad (5)$$

式中 c ——溶质浓度, g/L q_i ——水流量

D_{ij}^{ω} ——扩散度, cm²/min

1.4.4 定解条件

如图2所示,建立膜孔沟灌入渗数值计算模型,灌水沟横断面为对称的梯形断面均质土壤,考虑对称性,仅对面 CDKJ 左侧部分进行研究。图中 ABCJIH 为灌水沟横断面,面 OAHG 为沟顶,面 DKFE 为计算土体下边界;面 OEFHG 和 CDKJ 均为对称面,其水平通量为零;面 OABCDE 和 GHIJKF 均为零通量。

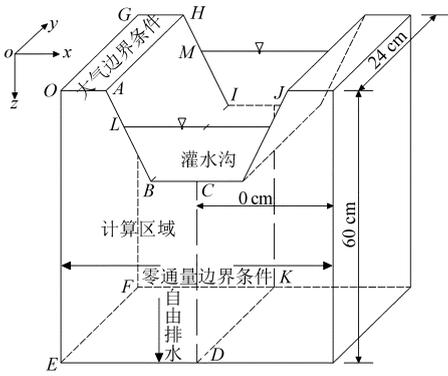


图2 膜孔沟灌入渗模拟模型

Fig.2 Infiltration simulation model of film hole furrow irrigation

(1) 初始条件

设计计算区域内土壤初始含水率、含盐量分布均匀,初始条件为

$$\theta_0 = \theta_{in} \quad (x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0, t = 0) \quad (6)$$

$$c_0 = c_{in} \quad (x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0, t = 0) \quad (7)$$

式中 θ_{in} ——土壤初始体积含水率, cm^3/cm^3

c_{in} ——土壤初始含盐量, g/kg

(2) 边界条件

①上边界 OAHG 面: $-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = 0,$

$D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial z} - q_i c = 0,$ 该面为灌水沟沟顶,其上种植作物,不考虑蒸发对入渗的影响,垂直通量为零。LBIM 面为水流与覆膜灌水沟沟壁的接触面,BCJI 面为水流与覆膜灌水沟沟底的接触面,2 个面上膜孔范围内区域含水率为饱和含水率,即 $\theta_0 = \theta_s, c_0 = c_{in}$;不考虑蒸发对水分入渗的影响,则膜孔范围外的区域其水平、垂直通量均为零,即 $-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = 0,$

$D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial z} - q_i c = 0。$

②下边界 EDKF 面:为自由排水边界,其含水率为初始含水率, $\theta_0 = \theta_{in}, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \frac{\partial c}{\partial z} = 0, z = 60 \text{ cm}。$

③左、右边界 OEF 面、CDKJ 面:均为对称面,可看作零通量, $D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial x} = 0。$

④前、后边界 OEDCBA 面、GFKJIH 面:均为零通量面, $D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial y} = 0。$

土壤水力参数如表 3 所示,初始含水率为 $0.012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3,$ 初始含盐量为 $6.402 \text{ g}/\text{kg}。$

表3 土壤水力参数

Tab.3 Soil hydraulic parameters

参数	残余含水率 $\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水率 $\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	进气吸力 α/cm^{-1}	形状系数 n	饱和导水率 $K_s/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	l
数值	0.065	0.43	0.075	1.89	0.073 68	0.5

2 模型模拟

2.1 模型可靠性验证

2.1.1 入渗湿润锋模拟与验证

本文另外布置了淡水入渗试验,试验土壤采用入渗速率较小的粘土,以便于更精确的获取湿润锋情况。土壤取自江苏昆山,土壤质地为粘土,其粒径组成和土壤水力参数如表 4 和表 5 所示。试验方法同前,初始含水率为 $0.119 \text{ cm}^3/\text{cm}^3。$

选择三维模型,根据模拟需要自行绘制出模拟区域,将 HYDRUS-3D 所需信息按照相应顺序输入程序,运行模型,并按照设定要求输出计算结果。模拟得到 3 种膜孔布置方案下(表 6)不同时刻的湿润锋发展情况,鉴于版面原因,仅以膜孔布置方案 2 的模拟结果为例进行说明。

图 3 为利用 HYDRUS-3D 模型模拟的膜孔布置方案 2 下入渗历时分别为 15、30、60、90、120 和 150 min 共 6 个时刻的湿润锋发展情况。

表4 淡水入渗试验土壤组成成分

Tab.4 Composition of soil for fresh water infiltration experiment

粒径范围/ μm	0~0.000 4	0.000 4~2	2~50	50~100	100~250	250~500	500~1 000	1 000~2 000
百分含量/%	12.7	76.3	7.29	2.84	0.72	0.13	0	0

表5 淡水入渗试验土壤水力参数

Tab.5 Soil hydraulic parameters of fresh water infiltration experiment

参数	残余含水率 $\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水率 $\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	进气吸力 α/cm^{-1}	形状系数 n	饱和导水率 $K_s/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	l
数值	0.068	0.41	0.008	1.09	0.003 33	0.5

注:表中数据通过率定得到。

表 6 淡水入渗试验膜孔布置方案

Tab.6 Film hole arrangement of fresh water infiltration experiment

序号	膜孔布置方案	开孔率/%	膜孔位置	膜孔个数	膜孔直径/cm	孔距/cm	入渗时间/min
1	全沟断面 5 排孔	3	沟底中线	1 个 1/2 孔	3	48	150
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 4 cm	1 个 1/2 孔	3	48	
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 8 cm	1 个 1/2 孔	3	48	
2	全沟断面 3 排孔	6	沟底中线	1 个全孔,2 个 1/2 孔	3	12	150
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 4 cm	1 个全孔,2 个 1/2 孔	3	12	
3	全沟断面 5 排孔	9	沟底与沟壁交界处	1 个全孔,2 个 1/2 孔	3	12	150
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 4 cm	1 个全孔,2 个 1/2 孔	3	12	
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 8 cm	1 个全孔,2 个 1/2 孔	3	12	

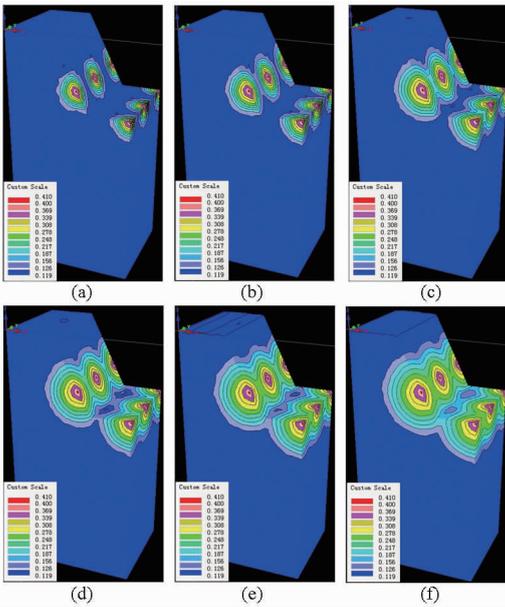


图 3 膜孔布置方案 2 不同时刻的湿润锋模拟值

Fig.3 Simulated wetting front of film hole arrangement 2 at different moments

- (a) 入渗历时 15 min 湿润锋 (b) 入渗历时 30 min 湿润锋
- (c) 入渗历时 60 min 湿润锋 (d) 入渗历时 90 min 湿润锋
- (e) 入渗历时 120 min 湿润锋 (f) 入渗历时 150 min 湿润锋

图 3 中,不同的颜色区域分别代表不同的土壤含水率,其最大值为饱和体积含水率,最小值为初始体积含水率。由图 3 可见,在入渗初期,各膜孔入渗的湿润体较小,相邻的膜孔入渗湿润锋互不相连;随入渗历时的延长,各膜孔入渗的湿润体逐渐增大,相邻膜孔的入渗湿润锋逐渐交汇,不同膜孔间的入渗开始相互干扰。

模拟入渗历时分别为 15、60 和 150 min 时,3 种膜孔布置方案下的入渗湿润锋膜模拟值与实测值的比较,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,各时刻湿润体形状的模拟结果与实测结果一致性较好,湿润锋的模拟值与实测值可以较好的吻合。3 种膜孔布置方案相比较,方案 1 的模拟结果与实测结果吻合程度最高,方案 2

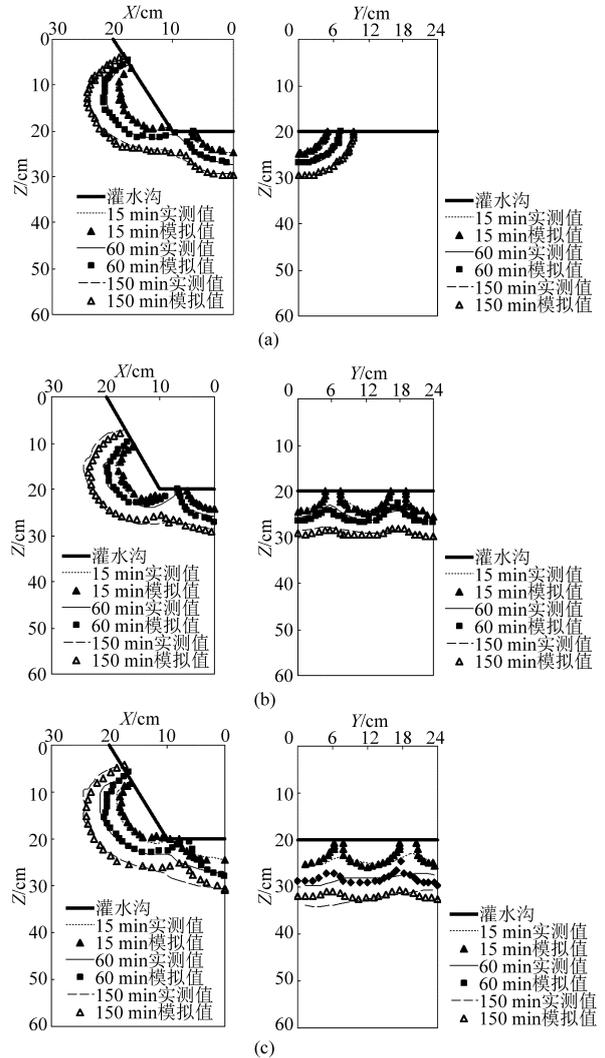


图 4 不同时刻的湿润锋实测值与模拟值对比

Fig.4 Comparison of simulated wetting front with measured value at different moments

- (a) 膜孔布置方案 1(开孔率 3%)
- (b) 膜孔布置方案 2(开孔率 6%)
- (c) 膜孔布置方案 3(开孔率 9%)

次之,方案 3 相对最低。这是由于一方面本文采用的土壤水分运动控制方程忽略了温度与土壤气体对水分运动的影响、温度与溶质对土壤水势的影响等,且一些土壤物理参数不易实测得到,只能通过反推

参数的方法获得,导致计算结果存在误差;另一方面,试验过程中易产生漏水现象,且开孔率越大越不容易控制,试验精度控制不够导致少量水分可能在膜孔范围之外的区域渗入土壤,从而影响试验结果。因此,尽量提高膜沟入渗试验过程的精度,避免漏水

现象出现,可利用 HYDRUS-3D 模型较好的模拟膜沟入渗湿润锋的发展过程。

2.1.2 水盐分布模拟与验证

不同膜孔布置方案(开孔率分别为 3%、6%、9%)下的水、盐模拟值与实测值对比如图 5 所示。

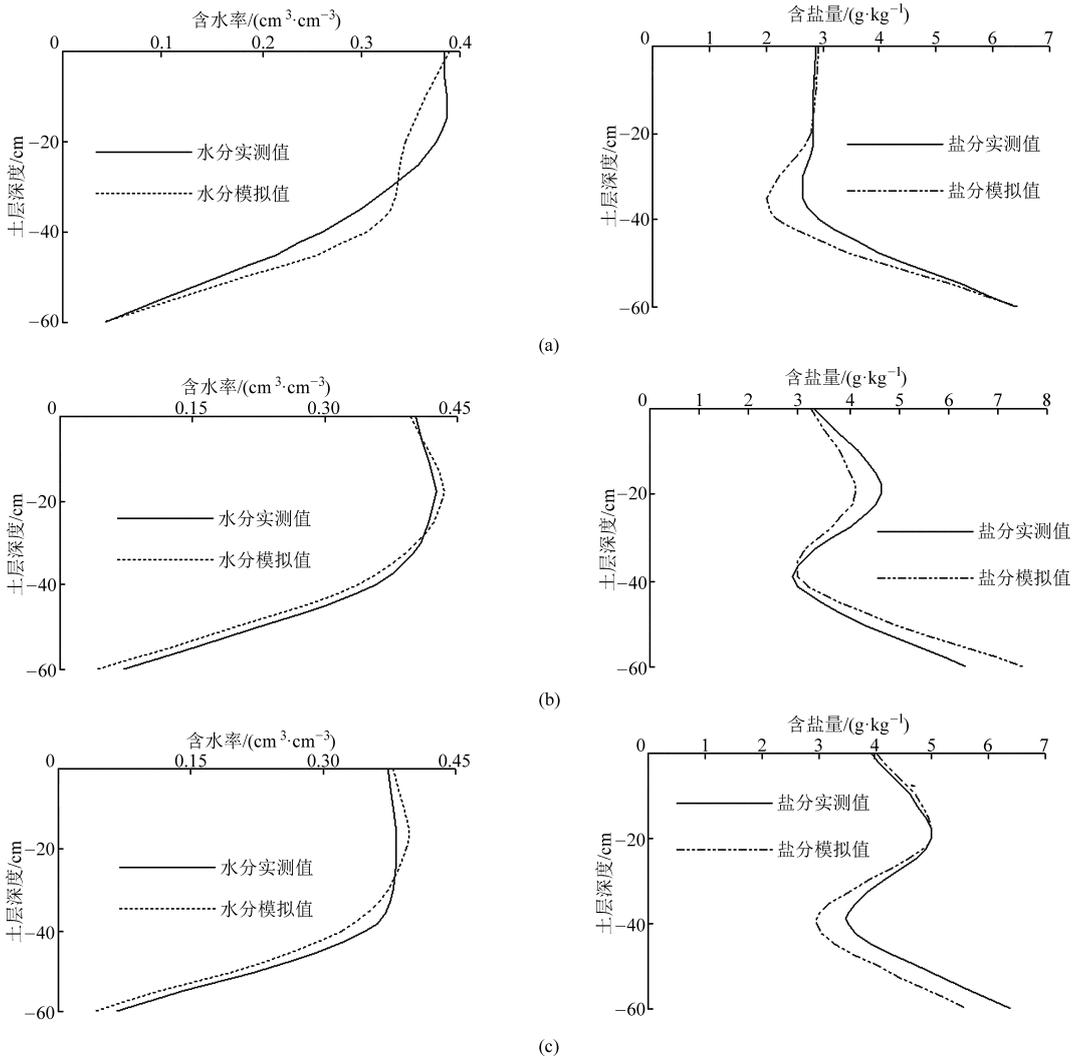


图5 微咸水膜孔沟灌水、盐实测值与模拟值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured soil water contents and salt contents under film hole furrow irrigation with brackish water

(a) 膜孔布置方案1(开孔率3%) (b) 膜孔布置方案2(开孔率6%) (c) 膜孔布置方案3(开孔率9%)

由图5可见,在灌水量相同的条件下,灌水后(停止灌水后立即进行观测)土壤含水率峰值基本出现在20~40 cm土层内,随开孔率的增大,水分峰值下移;20~40 cm土层内含盐量呈较明显的降低趋势,表明盐分随灌溉水迁移至深层土壤中。

土壤含水率、含盐量的模拟值与实测值之间存在一定误差,产生误差的原因一是由于非饱和和土壤水分运动参数测量困难导致的误差,二是由于试验精度控制不够导致实测数据本身的偏差。土壤含水率模拟值与实测值之间的误差绝对值均值为11.4%,土壤含盐量模拟值与实测值之间的误差绝

对值均值为8.1%,模拟值与实测值之间具有较好的一致性。因此,模型模拟结果可较好的体现出灌水后的水、盐分布规律。

2.2 模型应用

膜孔沟灌一方面具有局部灌溉的效果,有利于增大侧向入渗而减少垂向入渗,避免深层渗漏,提高灌溉水的利用率,实现节水、增产;另一方面,盐分随水分迁移,此种灌溉方式易导致土壤理化性状的变化,从而对作物生长产生影响。因此,有必要对膜孔沟灌下的灌水量进行研究,灌水量对地下水水位和水质的改变、出苗率及作物产量的影响很大,准确掌

握合理的灌水量对节水、增产具有十分重要的意义。

由于试验区土壤含盐量较大,需要考虑作物的耐盐性。试验区种植作物为花生,花生抗旱耐瘠,是经济效益较高的作物,适宜在中性偏酸的土壤中种植^[18]。花生属于中等耐盐作物^[19],其耐盐程度有限,不同生育期耐盐程度不同。Mass 和 Hoffman 等^[20]提出了土壤含盐量阈值,认为各种作物对盐分的敏感程度不同。郭峰等^[21]发现盐害影响花生种子发芽势、发芽率等多种活力指标。胡晓辉等^[22]采用盐化土壤盆钵全生育期栽培法,在 0、0.1%、0.3%、0.5% 和 0.7% NaCl 浓度胁迫下,比较了 5 个花生品种的耐盐性,结果表明,采用 0.7% 左右的 NaCl 浓度是鉴定花生品种耐盐性的浓度阈值。吴兰荣等^[18]通过全生育期耐盐鉴定表明,花生不同生育期的耐盐能力不同,其中,芽期和幼苗期对盐害最敏感。如果以减产 50% 时的盐浓度作为花生的耐

盐系数,则花生耐盐阈值在 2~3 g/L 之间。

根据上述分析,膜孔沟灌条件下的灌水量既要满足作物需水要求,还要保证作物耐盐度的问题。HYDRUS-3D 模型已被证明能够模拟膜孔沟灌条件下的水盐运移,因此,借助该模型研究膜孔沟灌条件下合理的灌水量。

2.2.1 模拟方案

模拟采用的膜孔布置方案与前述室内试验设计膜孔布置方案一致,即:开孔率分别为 3%、6%、9%;膜孔布置方式分别为:全沟断面 6 排孔、孔距 12 cm,全沟断面 6 排孔、孔距 6 cm;全沟断面 6 排孔、孔距 4 cm。初始含水率、含盐量为室内试验实测土壤初始含水率 0.012 cm³/cm³、实测土壤初始含盐量 6.402 g/kg;灌水量参照灌溉实践经验设为 300、450、600、750 和 900 m³/hm²,共 5 个水平。模拟方案见表 7。

表 7 不同灌水量模拟方案

Tab.7 Simulation schemes with different amounts of irrigation water

序号	膜孔布置方案	开孔率/%	膜孔位置	膜孔直径/cm	孔距/cm	初始含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	初始含盐量/(g·kg ⁻¹)	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)
1	全沟断面 6 排孔	3	沟底与沟壁交界处	2	12	0.012	6.402	300
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 4 cm	2	12			450
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 8 cm	2	12			600
								750
								900
2	全沟断面 6 排孔	6	沟底与沟壁交界处	2	6	0.012	6.402	300
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 4 cm	2	6			450
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 8 cm	2	6			600
								750
								900
3	全沟断面 6 排孔	9	沟底与沟壁交界处	2	4	0.012	6.402	300
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 4 cm	2	4			450
			单侧沟壁,膜孔中心距沟底 8 cm	2	4			600
								750
								900

2.2.2 模拟结果与分析

利用 HYDRUS-3D 模拟不同膜孔布置方案下不同灌水量时的土壤水、盐分布。鉴于版面原因,只列出开孔率为 3% 的模拟结果,如图 6 所示。

模拟结果表明:灌水量为 300 m³/hm²时,3%、6% 和 9% 开孔率下 0~40 cm 土层内的土壤含盐量分别为 3.73、3.40、3.77 g/kg,均高于花生的耐盐度,压盐效果不明显;灌水量为 450~900 m³/hm²时,各模拟方案中 0~40 cm 土层内的土壤含盐量在 2.11~3.0 g/kg 范围内,均低于花生的耐盐度。

2.2.3 模拟结果评价

由于花生的根系主要分布在 30 cm 左右,以 0~40 cm 土层内灌水效率和土壤脱盐率作为评价指标

(表 8),0~40 cm 土层灌水效率越高土壤脱盐率越高,灌水效果越好。通过不同模拟方案下 0~40 cm 土层灌水效率和土壤脱盐率统计分析发现,相同开孔率时,随灌水量由 300 m³/hm²增至 900 m³/hm²,灌水效果反而降低,这是由于随着灌水量的增大,土壤脱盐率随着灌水量的增大而提高,但相应深层渗漏的增大也降低了灌水效率,从而导致灌水效率降低。

参照目前已有对花生耐盐性的研究结果,以 3 g/kg 作为灌后土壤含盐量的衡量标准,对表 8 中数据进行分析可得,花生的根系主要分布在 30 cm 左右,灌溉水将土壤中的盐分淋洗到更深的土层中,3%、6% 和 9% 开孔率下的脱盐率均在 46% 以上,能

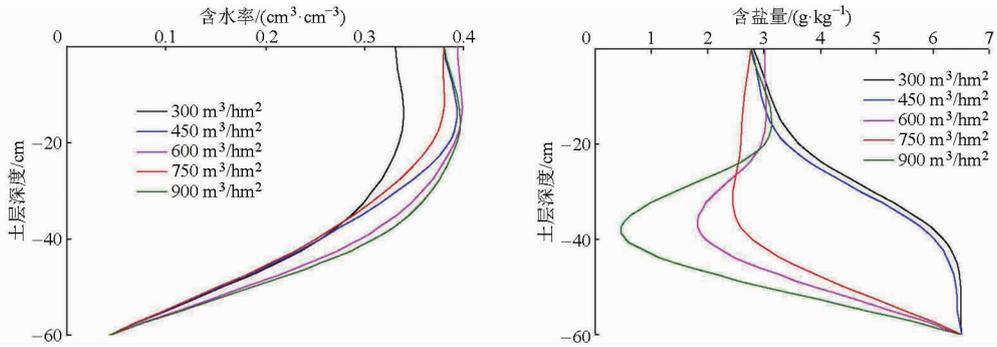


图6 膜孔布置方案1(开孔率3%)不同灌水量下的水、盐模拟结果

Fig.6 Simulated soil water contents and salt contents of film hole arrangement 1 with different amounts of irrigation water

在短期内达到0~40 cm 土层压盐的效果,可为花生生长提供良好环境。因此,为达到节水压盐的效果,花生膜孔沟灌条件下的灌水量不宜小于 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

表8 模拟结果评价指标

Tab.8 Evaluation indexes of simulation results

序号	膜孔布置方案	开孔率/%	灌水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	0~40 cm 土层灌水效率/%	0~40 cm 土层脱盐率/%
1	全沟断面6排孔	3	300	85.891	45.28
			450	81.38	55.81
			600	70.93	58.64
			750	47.84	57.48
			900	49.65	67.04
2	全沟断面6排孔	6	300	90.301	45.37
			450	88.38	49.38
			600	86.50	49.80
			750	70.28	49.97
			900	60.40	51.58
3	全沟断面6排孔	9	300	89.729	44.29
			450	88.85	46.78
			600	87.98	50.17
			750	72.97	52.41
			900	61.92	55.11

3 结论

(1)利用 HYDRUS-3D 模型对室内试验条件下的膜孔沟灌水盐运移进行了数值模拟研究,湿润体内土壤含水率以及含盐量的模拟值与实测值之间虽存在一定偏差,但偏差在一定允许范围内,模拟值与实测值之间仍具有较好的一致性,因此,利用 HYDRUS-3D 模型模拟膜孔沟灌入渗的水盐分布可靠性较高。这将对设计合理的膜孔沟灌系统给予很大帮助。

(2)对 HYDRUS-3D 模型进行应用,设计3种开孔率下4个灌水量水平的模拟方案,通过模型模拟对不同方案下的水盐运移规律进行探索,模拟结果表明:为达到节水压盐的效果,花生在膜孔沟灌条件下的灌水量不宜小于 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

(3)利用 HYDRUS-3D 模型模拟膜孔沟灌水盐运移产生的误差在模拟计算土壤水盐运动规律中普遍存在且较难克服,但误差在一定允许范围内,并不影响对膜孔沟灌土壤水盐运移主要过程的预测。另外,本次模拟是在土壤质地均匀、无结构差异、初始含水率、初始含盐量一定的理想条件下进行的,与实际的大田条件有一定差别,研究结果的推广和应用还有待进一步验证与完善。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报2011年[R]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- 2 刘昌明,何希吾. 中国21世纪水问题方略[M]. 北京:科学出版社,1996:1-5.
- 3 单婕,邵孝侯. 劣质水农业高效安全利用技术的研究现状及其展望[J]. 水资源保护,2006,22(1):19-22.
Shan Jie, Shao Xiaohou. Status and prospects of high-efficient and safe utilization of poor quality water for agriculture[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(1): 19-22. (in Chinese)
- 4 赵玉婷,张征,吕连宏,等. 基于地下水多变量空间聚类分析的变异性评价[J]. 地球科学与环境学报,2009,31(1):79-84.
Zhao Yuting, Zhang Zheng, Lü Lianhong, et al. Spatial variability assessment based on spatial cluster analysis of groundwater variables[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1): 79-84. (in Chinese)
- 5 姜凌,李佩成,郭建青. 贺兰山西麓典型干旱区绿洲地下水水化学特征与演变规律[J]. 地球科学与环境学报,2009,31(3):285-290.
Jiang Ling, Li Peicheng, Guo Jianqing. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in typical oasis of arid areas on the west of Helan mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(3): 285-290. (in Chinese)
- 6 刘友兆,付光辉. 中国微咸水资源化若干问题研究[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(2):57-60.

- Liu Youzhao, Fu Guanghui. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(2): 57-60. (in Chinese)
- 7 Ayars J E, Schoneman R A, Dale F, et al. Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 47(3): 243-264.
- 8 郭永杰, 崔云玲, 吕晓东, 等. 国内外微咸水利用现状及利用途径[J]. *甘肃农业科技*, 2003(8): 3-5.
- 9 Shalhevet J. Using water of marginal quality for crop production: major issues[J]. *Agricultural Water Management*, 1994, 25(3): 233-269.
- 10 Pasternak D, Sagih M, DeMalach Y, et al. Irrigation with brackish water under desert conditions XI. Salt tolerance in sweet-corn cultivars[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 28(4): 325-334.
- 11 Mordechai Magaritz, Arie Nadler. Agrotechnically include salinization in the unsaturated zone of loessial soils, N. W. Negev, Israel[J]. *Groundwater*, 1993, 31(3): 363-369.
- 12 张旭贤. 塔里木灌区膜下滴灌土壤水盐运移规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- 13 马海燕. 膜孔沟灌入渗规律试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- 14 Abbasi F, Feyen J, van Genuchten M T. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 290(1-2): 63-79.
- 15 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌溉情景下氮素迁移的模拟[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 853-858.
- Hao Fanghua, Sun Wen, Zeng Ayan, et al. Simulation of N transfer under different irrigation and fertilization scenarios in the Hetao irrigation area using HYDRUS-1D model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 853-858. (in Chinese)
- 16 孟江丽, 董新光, 周金龙, 等. HYDRUS 模型在干旱区灌溉与土壤盐化关系研究中的应用[J]. *新疆农业大学学报*, 2004, 27(1): 45-49.
- Meng Jiangli, Dong Xinguang, Zhou Jinlong, et al. Application of HYDRUS model to study of relation between irrigation and soil salinity in the arid area[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2004, 27(1): 45-49. (in Chinese)
- 17 Simunek J, Sejna M, van Genuchten M T. The HYDRUS-1D software package for simulating the one dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0[M]. Riverside: Colorado School of Mines Publishers, 1998.
- 18 吴兰荣, 陈静, 许婷婷, 等. 花生全生育期耐盐鉴定研究[J]. *花生学报*, 2005, 34(1): 20-24.
- Wu Lanrong, Chen Jing, Xu Tingting, et al. Identification of salt tolerance in peanut growth duration[J]. *Journal of Peanut Science*, 2005, 34(1): 20-24. (in Chinese)
- 19 Abrol I P, Yadav J S P, Massoud F I. Salt-affected soil and their management FAO soil bulletin 39[M]. Rome: FAO, 1988: 1-9.
- 20 Hoffman G J, Rawlins S L, Garget M J, et al. Water relation and growth of cotton as influenced by salinity and relative humidity[J]. *Agronomy Journal*, 1971, 63(6): 822-826.
- 21 郭峰, 万书波, 李新国, 等. NaCl 胁迫对花生种子萌发的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(3): 177-181.
- Guo Feng, Wan Shubo, Li Xinguo, et al. Effects of NaCl stress on seed germination of peanut[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3): 177-181. (in Chinese)
- 22 胡晓辉, 孙令强, 苗华荣, 等. 不同盐浓度对花生品种耐盐性鉴定指标的影响[J]. *山东农业科学*, 2011(11): 35-37.
- Hu Xiaohui, Sun Lingqiang, Miao Huarong, et al. Effects of different NaCl concentrations on indicators for evaluation salt tolerance of peanut varieties[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011(11): 35-37. (in Chinese)